

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Studijní program: B 2341 - Strojírenství

Obor: 2302 R022 - Stroje a zařízení

Zaměření: Stavba strojů

Analýza a optimalizace zvlákňovací hlavy

Analysis and optimization of the spinning head

Bakalářská práce

Autor: Matěj Mihálik

Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.

Konzultant práce: Ing. Karel Pejchar

Číslo práce: KTS-B066

Rozsah práce

Počet stran: 47

Počet obrázků: 26

Počet tabulek: 8

Počet grafů: 10

v Liberci 23. 5. 2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Matěj MIHÁLIK
Studijní program	B 2341 Strojírenství
Obor	2302 R022 Stroje a zařízení
Zaměření	Stavba strojů

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

Analýza a optimalizace zvlákňovací hlavy.

Zásady pro vypracování:

(uved'te hlavní cíle bakalářské práce doporučené metody pro vypracování)

1. Rešerše způsobů výroby nanovláken elektrostatickým zvlákňováním.
2. Analýza současné zvlákňovací hlavy z hlediska intenzity elektrostatického pole.
3. Optimalizace elektrického pole úpravou geometrie zvlákňovací hlavy.
4. Návrh konstrukčních úprav zvlákňovací hlavy.

Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva: **30 stran formát A4**
- grafické práce: **Výkres sestavy hlavy, výkresová dokumentace**

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

1. Lukáš D., a kol.: *Physical principles of electrospinning (Electrospinning as a nano-scale technology of twenty-first century)*, *Textile Progress*, 41 (2009), 59-140, ISSN 0040-5167
2. http://spisy.upv.cz/Applications/2009/PPVCZ2009_0425A3.pdf
3. <http://cs.wikipedia.org/wiki/Nanovl%C3%A1kno>
4. <http://21stoleti.cz/blog/2005/01/21/unikatni-technologie-pro-vyrobu-nanovlaken-vznikla-v-cr/>
5. Hübner, K.: Analýza a optimalizace zařízení na výrobu nanovláken. Bakalářská práce TUL, Liberec 2012.

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Karel Pejchar



prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.

vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.

děkan FS

V Liberci dne 19. 11. 2012

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in the case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date

Signature

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu prof. Ing. Jaroslavu Beranovi, CSc. za vedení této bakalářské práce, cenné rady, doporučení a věcné připomínky a celé katedře KTS za pomoc při všech otázkách a problémech.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou a optimalizací zvlákňovací hlavy u zařízení na výrobu nanovláken elektrostatickým zvlákňováním. Zaměřuje se na optimalizaci elektrostatického pole v okolí zvlákňovací hlavy. Ta je provedena na základě simulací MKP v programu Autodesk Algor Simulation 2012.

V teoretické části je výtah z oblasti fyziky, konkrétně elektrostatiky. Dále jsou popsány druhy výroby nanovláken s důrazem na elektrostatické zvlákňování.

V praktické části jsou provedeny analýzy a vyhodnoceny výsledky pro různá konstrukční řešení. Na jejich základě se navrhla upravená konstrukce zvlákňovací hlavy.

Klíčová slova

Elektrostatické zvlákňování, elektrostatické pole, intenzita, elektroda, Nanospider

Annotation

This bachelor thesis deals with analysis and optimization of spinning head in the electrospinner. It focuses on optimization of electrostatic field around the spinning head. It is done on the basis of FEM simulations using Autodesk Algor Simulation 2012 software.

At first abstract from the physics specifically of electrostatics is in the theoretical part. Then individual methods for producing nanofibers with emphasis on electrospinning are described.

Electrostatic analyses are performed and results of simulations are analyzed in the practical part. Modified spinning head is designed according to these results.

Key words

Electrospinning, electrostatic field, intensity, electrode, Nanospider

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

d	průměr zvlákňovací elektrody [mm]
D	průměr koule [mm]
E	intenzita elektrického pole [V/m]
$ E_i _{\min}$	minimální hodnota intenzity v i -tém uzlu [V/m]
$ E_i _{\max}$	maximální hodnota intenzity v i -tém uzlu [V/m]
$ E _{\max}$	globální maximální hodnota intenzity [V/m]
E_{2D}	velikost intenzity na povrchu elektrody ve 2D analýzách [V/mm]
$E_{\text{střed}}$	velikost intenzity na povrchu uprostřed elektrody [V/mm]
E_{40}	velikost intenzity na povrchu 40mm od středu elektrody [V/mm]
E_{koule}	velikost intenzity na povrchu koule [V/mm]
F_e	elektrická síla [N]
k	konstanta úměrnosti [Nm^2/C^2]
P_i	přesnost v i -tém uzlu [-]
q	jednotkový elektrický náboj [C]
Q	elektrický náboj [C]
r	vzdálenost nábojů [m]
ϵ_0	permitivita vakua [F/m]
ϵ_r	relativní permitivita [-]
ϕ	elektrický potenciál [V]

OBSAH

1 ÚVOD	9
2 ELEKTROSTATIKA	10
3 METODY PŘÍPRAVY NANOVLÁKEN	13
3.1 DLOUŽENÍ (DRAWING)	13
3.2 PODLOŽKOVÁ SYNTÉZA (TEMPLATE SYNTHESIS)	13
3.3 FÁZOVÁ SEPARACE (PHASE SEPARATION)	14
3.4 SAMO-ORGANIZOVÁNÍ (SELF ASSEMBLY)	14
3.5 ODSŘEDIVÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ (FORCE SPINNING)	14
3.6 ELEKTROSTATICKÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ	15
3.6.1 HISTORIE	15
3.6.2 PRINCIP	16
3.6.3 VARIANTY	17
3.6.4 OVLIVŇUJÍCÍ PARAMETRY	20
4 SIMULACE ELEKTROSTATICKÉHO POLE	22
4.1 PREPROCESSING	22
4.2 PROCESSING	25
4.3 POSTPROCESSING	25
5 ANALÝZA PŮVODNÍ KONSTRUKCE	27
6 ANALÝZA TVARU ZVLÁKŇOVACÍ ELEKTRODY	28
6.1 ZMĚNA PRŮMĚRU ELEKTRODY	28
6.2 ZMĚNA TVARU ELEKTRODY	29
7 OPTIMALIZACE ELEKTROSTATICKÉHO POLE	31
7.1 NÁVRH KOULÍ	31
7.2 NÁVRH DESKY	37
8 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ ELEKTRODY	39
9 ZÁVĚR	44
10 POUŽITÁ LITERATURA	45
11 PŘÍLOHA	47

1 ÚVOD

Dějiny přírodních věd jsou plné příkladů, že z nejbáznivějších nápadů klíčí geniální myšlenky. Lépe řečeno, pokrok prostě nelze zastavit. V roce 2013 jsou tímto pokrokem již nějakou chvíli dozajista nanovlákná. Vlákná, která mají svůj průměr menší než 1000 nanometrů (10^{-9} m). Díky svým unikátním vlastnostem, mezi které patří velký měrný povrch, nízká hustota, vysoká pórovitost, výborné mechanické vlastnosti, se rychle řadí na přední příčky nejdůležitějších textilních materiálů.

Technologie, které se zabývají výrobou těchto vláken, se nazývají nanotechnologie. Jako jedna z prvních technologií, které dokázaly vyrábět nanovlákná průmyslově, bylo elektrostatické zvlákňování. Tento způsob zdokonalili v roce 2005 na textilní fakultě Technické univerzity v Liberci. Podstatou byl poznatek, že zvlákňovat lze i z tenké vrstvy polymerního roztoku. Zvlákňovací elektrodou zde byl válec. Princip spočívá v tom, že se mezi dvěma opačně nabitými elektrodami, z nichž jedna je v kontaktu s polymerním roztokem, vytváří nabitý proudy polymeru, které vlivem intenzity elektrostatického pole zmenšují svůj průměr a následně se ukládají na druhé elektrodě, které se říká kolektor.

Proces elektrostatického zvlákňování ovlivňuje mnoho vlivů. Za jeden z nejdůležitějších se považuje rozložení intenzity elektrostatického pole. To ovlivňuje geometrie součástí a také jejich fyzikální vlastnosti. Týká se to především elektrod.

Úkolem této bakalářské práce je analyzovat a optimalizovat zvlákňovací hlavu z hlediska rozložení elektrostatického pole. Analýzy jsou prováděny v softwaru Autodesk Algor Simulation 2012 a na základě jejich výsledků je provedena optimalizace.

2 ELEKTROSTATIKA

Elektrostatika je část fyziky, která studuje elektrické jevy související s ustáleným vzájemným silovým působením elektricky nabitých částic a těles.

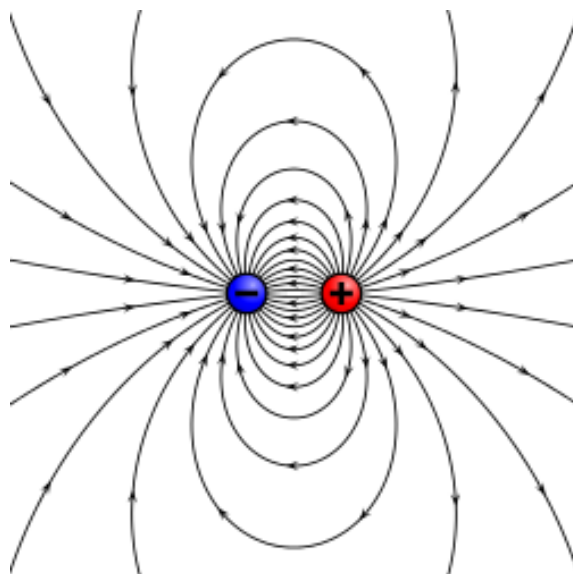
Základním pojmem elektrostatiky je statické elektrické pole, které lze popsat pomocí intenzity elektrického pole nebo elektrického potenciálu.

Základním zákonem elektrostatiky je Coulombův zákon, ze kterého lze odvodit další zákony a věty elektrostatiky. [1]

STATICKÉ ELEKTRICKÉ POLE

Elektrostatické pole je časově neměnné elektrické pole, ve kterém nevznikají elektrické proudy, což znamená, že se elektrické náboje nepohybují. Pole zobrazují siločáry (obr. 1) a popisuje ho elektrická intenzita a elektrický potenciál. [2]

Siločáry jsou spojitě křivky, které se nikdy neprotínají. Začínají v kladně nabitých tělesech a končí v záporně nabitých tělesech. Podle hustoty siločar můžeme určit, jak je pole silné. Čím větší hustota siločar, tím silnější je pole. [5]



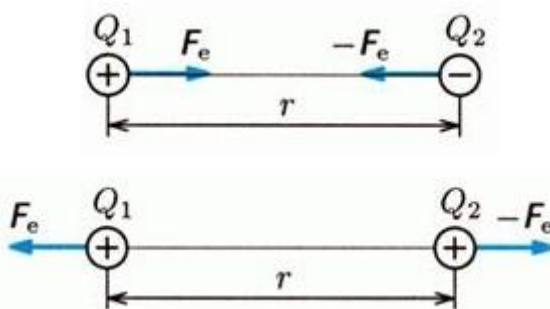
Obr. 1: Znárodnění siločar elektrického pole. Čerpáno z [3].

COULOMBŮV ZÁKON

Víme, že elektricky nabitá tělesa na sebe navzájem působí silami tak, že dvě souhlasně nabitá tělesa (dvě kladně nebo dvě záporně nabitá tělesa) se navzájem odpuzují a dvě nesouhlasně nabitá tělesa (jedno těleso s kladným a druhé se záporným nábojem) se navzájem přitahují. Tento zákon (1) vyjadřuje vzájemné silové působení elektricky nabitých těles. [8]

$$F_e = k \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2} \quad (1)$$

Dva bodové elektrické náboje Q_1 a Q_2 se navzájem přitahují nebo odpuzují stejně velkými elektrickými silami F_e a $-F_e$ opačného směru (obr. 2). Velikost každé síly je přímo úměrná absolutní hodnotě součinu nábojů Q_1 a Q_2 a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti r . [8]



Obr. 2: Vzájemné působení 2 bodových elektrických nábojů. Čerpáno z [8].

Konstanta úměrnosti k závisí na prostředí, v němž na sebe elektrické náboje působí. Pro vakuum a přibližně i pro vzduch je $k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2 \text{ C}^{-2}$. V případě jiných prostředí píšeme konstantu k , která závisí na relativní permitivitě daného prostředí, jako (2):

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \quad (2)$$

Relativní permitivita ϵ_r vyjadřuje, kolikrát se elektrická síla zmenší v případě, že tělesa s elektrickým nábojem jsou místo ve vakuu umístěna v látkovém prostředí. [23] Je to poměrná veličina, a proto je bezrozměrná.

INTENZITA ELEKTRICKÉHO POLE

Intenzita elektrického pole (též elektrická intenzita) je vektorová fyzikální veličina, která vyjadřuje velikost a směr elektrického pole. Je definována (3) jako elektrická síla působící na těleso s kladným jednotkovým elektrickým nábojem. [4]

$$E = \frac{F_e}{q} \quad (3)$$

ELEKTRICKÝ POTENCIÁL

Elektrický potenciál je skalární fyzikální veličina, která charakterizuje elektrickou energii nábojů. [6] Je definován (4) jako podíl potenciální energie E_p bodového náboje v určitém místě elektrického pole a tohoto náboje q . [8]

$$\varphi = \frac{E_p}{q} \quad (4)$$

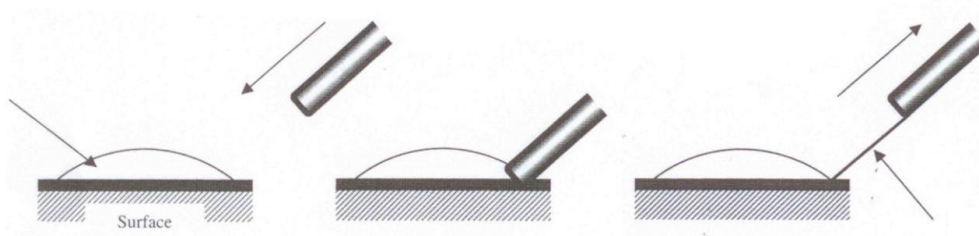
Vytváří skalární pole, které je znázorněno ekvipotenciálními plochami. To jsou plochy vyznačující se stejnou hodnotou potenciálu a jsou vždy kolmé na siločáry. [7]

3 METODY PŘÍPRAVY NANOVLÁKEN

Nanovlákná jsou textilní výrobky s průměrem menším než $1\mu\text{m}=1000\text{nm}$. [11] Právě díky své struktuře mají nanovláknenné materiály unikátní vlastnosti a nabízí netušené možnosti pro jejich využití v mnoha oblastech. Nanovláknó je tak malé a lehké, že jeho jen o trochu větší množství než jeden gram by obtočilo Zemi kolem rovníku. [12] Lze tedy tvrdit, že nanomateriály patří mezi materiály budoucnosti. Nanovlákná lze vyrobit několika způsoby.

3.1 DLOUŽENÍ (DRAWING)

Dloužení je proces podobný jako zvlákňování za sucha ve vláknářském průmyslu, který může produkovat velmi dlouhá jednotlivá nanovlákná. [9] Podstatou procesu je přiblížení mikropipety ke kapce polymeru, ze které se následně vytahuje vlákno (obr. 3). Rychlost vytahování vlákna je cca $10^{-4}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Je to diskontinuální proces, který se využívá pouze v laboratorních technologiích. Rozměry vláken nelze řídit. Jejich průměr se pohybuje v rozmezí 2-100nm. [10]



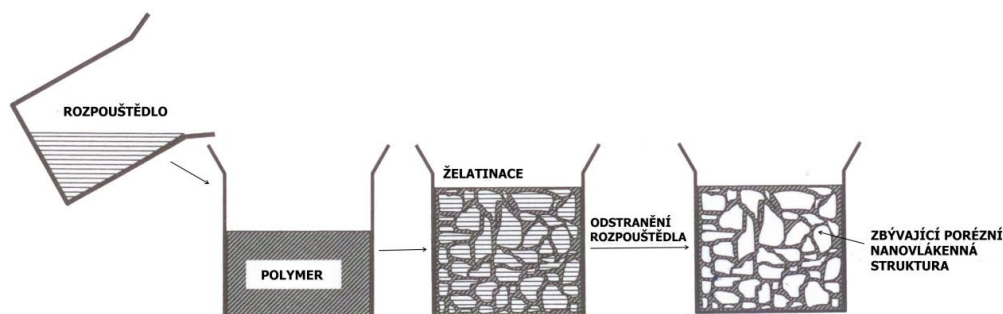
Obr. 3: Výroba nanovláken dloužením. Čerpáno z [10].

3.2 PODLOŽKOVÁ SYNTÉZA (TEMPLATE SYNTHESIS)

Podložková syntéza je metoda využívající membránu s nanorozměrnými póry pro tvorbu nanovláken nebo nanotrubiček a to z různých materiálů, např. elektricky vodivých polymerů, kovů, polovodičů, a uhlíku. Tato metoda však není schopná produkovat jednotlivá nanovlákná. [9] Využívá se také jenom pro laboratorní výrobu, ale můžeme při ní řídit průměr vláken, který je cca 100nm. [10]

3.3 FÁZOVÁ SEPARACE (PHASE SEPARATION)

Fázová separace (obr. 4) se sestává z rozpouštění, želatinace, extrakce použitím různých rozpouštědel, mrazení a sušení z čehož následně vznikne nanorozměrná pórovitá pěna. Proces je časově náročný pro převod pevného polymeru do nanoporézní pěny. [9] Tato metoda se používá v laboratořích a průměr vláken je mezi 50-500nm. Nevýhodou je, že se dají použít jen některé druhy polymerů. [10]



Obr. 4: Postup výroby fázovou separací. Čerpáno z [10].

3.4 SAMO-ORGANIZOVÁNÍ (SELF ASSEMBLY)

Samo-organizování je proces, ve kterém se jednotlivé prvotní složky organizují do požadovaných vzorů a funkcí. [9] Nanovlákná se budují z menších molekul jako ve stavebnici. [10] Stejně jako proces fázové separace jde o časově náročné zpracování kontinuálních polymerních nanovláken. [9] Tato metoda je opět pouze pro laboratorní výrobu. Průměr vláken je 7-100nm. [10]

3.5 ODSŘEDIVÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ (FORCE SPINNING)

V této technologii se využívá účinku odstředivé síly. Díky tomu je cenově výhodnější než metody, které využívají stlačený vzduch nebo vysoké napětí. Hlava, která obsahuje zásobník s roztokem, se otáčí vysokou úhlovou rychlostí kolem vertikální osy. Po obvodu hlavy jsou trysky, které vystřikují roztok. Po opuštění trysky vznikají nanovlákná a ukládají se na kolektor. Touto metodou lze zpracovávat roztoky i roztavené materiály. Tato technologie má potenciál vyrovnat se elektrostatickému zvlákňování. [27]

3.6 ELEKTROSTATICKÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ

Elektrostatické zvlákňování je způsob přípravy ultra jemných vláken z polymerního roztoku nebo polymerní taveniny pomocí elektrostatických sil. Častěji jsou ale zvlákňovány polymery ve formě roztoku, protože vyšší viskozita polymerních tavenin nedovoluje utváření jemných vláken. [9]

Elektrostaticky zvlákněná nanovláknna mají řadu významných vlastností, které je činí výbornými kandidáty pro širokou škálu aplikací jako vysoce účinné filtry, separační membrány, výztuhy pro kompozitní materiály, tkáňové inženýrství, ale i jako nanoelektrická zařízení a vodíkové nádrže pro palivové články. [9]

3.6.1 HISTORIE

Výzkum fyzikálního jevu spojeného s elektrospinningem začal William Gilbert již v 17. století, když jako první člověk objevil, že kulovité kapky vody na suchém povrchu vytvoří kuželovitý tvar poté, co je od ní ve vhodné vzdálenosti umístěn kousek třeného jantaru.

V rozmezí let 1934 a 1944, publikoval Anton Formhals sérii patentů popisujících experimentální zařízení pro produkci polymerních vláken s použitím elektrostatické síly.

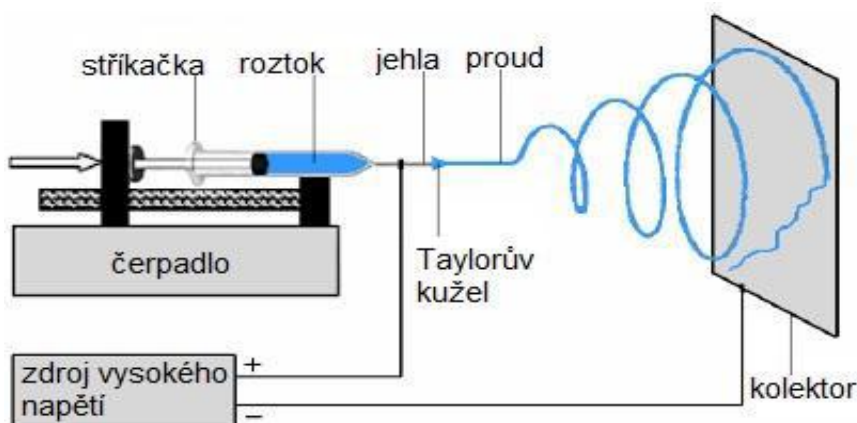
V 60. letech 20. století, Vonnegut a Neubauer vynalezli přístroj pro elektrostatické rozprašování (electrospraying), kterým byli schopni vyrábět proudy vysoce elektrizovaných jednotných kapiček o průměru asi 0,1 mm. Drozin vyšetřoval rozptýl řady kapalin do aerosolů pod vysokými elektrickými potenciály.

V roce 1971 sestrojil Baumgarten zařízení pro elektrostatické zvlákňování akrylových vláken s průměry pod 1000 nanometrů.

Během raných 90. let 20. století dokázali Reneker a Chun oživit zájem o tuto technologii zpracováním širokého rozsahu polymerních roztoků. Podobnou práci provedli Larrondo a Manley v oblasti polymerních tavenin. [9]

3.6.2 PRINCIP

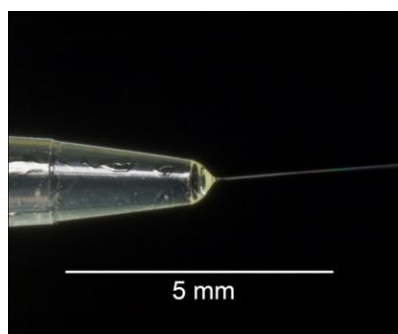
V procesu elektrostatického zvlákňování (obr. 5) je využito vysoké napětí k vytvoření elektricky nabitého proudu polymerního roztoku nebo taveniny. [9]



Obr. 5: Princip výroby nanovláken elektrostatickým zvlákňováním. Čerpáno z [10].

Celý proces se odehrává díky dvěma opačně nabitým elektrodám. Polymerní roztok je přímo v kontaktu se zvlákňovací elektrodou, která bývá nejčastěji připojena na kladný potenciál napětí. Druhá elektroda, které se říká kolektor, je umístěna ve vhodné vzdálenosti od zvlákňovací elektrody. Kolektor je připojený na záporný potenciál napětí nebo bývá také často uzemněn. Je to elektroda sběrná. Vlákná přenášejí elektrický náboj z jedné elektrody na druhou a uzavírají tak elektrický obvod.

V důsledku vysokého napětí se na zvlákňovací elektrodě indukují v roztoku elektrické náboje. [16] Zvýšením velikosti elektrických nábojů se povrch roztoku deformuje. Působí proti sobě Coulombova síla nábojů a povrchové napětí roztoku. [13] Vznikne tak kuželovitý tvar známý jako Taylorův kužel (obr. 6).



Obr. 6: Nabitý proud polymeru vycházející z Taylorova kužele. Čerpáno z [15].

Při dalším zvyšování se dosáhne kritické hodnoty. Coulombova síla je v rovnováze nebo překoná povrchové napětí roztoku. Z vrcholu Taylorova kužele poté vznikne nabitý proud polymeru. [13]

Nabitý proud se přemísťuje do míst s nižším potenciálem. V tomto případě směrem ke kolektoru. Proud se v elektrickém poli zrychluje a ztenčuje. Nastává proces dloužení. [9] Ten se skládá ze dvou oblastí. První oblast je stabilní a druhá je nestabilní. Stabilní oblast je charakterizována přímočarou trajektorií proudu. Vlastnosti roztoku sníží nebo úplně odstraní rozpad proudu na jednotlivé kapičky [13]. Z polymerních proudů tak vznikají jednotlivá vlákna. Tento proces se nazývá elektrostatické zvlákňování.

Nestabilní oblast souvisí s náhlým odpařováním rozpouštědla z proudu. Redukuje se průměr vláken. Tato oblast je charakteristická ohybovou nestabilitou a nepřímou trajektorií. Náboj se na povrchu vláken zvětšuje, a proto se proud rozdělí na několik menších. Tento proces se může opakovat i několikrát. Dochází k výraznému větvení paprsku, což vede k vytvoření velkého množství proudů s menším průměrem. U polymerního roztoku se odpaří téměř celá část rozpouštědla. Vlákna poté ztuhnou a uloží se na kolektor. Toto má za následek ve většině případů náhodně orientovanou vrstvu nanovláken. [9] [13]

3.6.3 VARIANTY

Jednotlivé týmy pracují na metodě elektrostatického zvlákňování s různými roztoky a různým výrobním zařízením. Některé dávají přednost zvlákňovací elektrodě umístěné nad kolektorem. Využívají přitom také gravitační síly a nechávají kapalinu odkapávat směrem ke kolektoru. Zvlákňovací elektroda se umísťuje také pod kolektor, kde následně vzniká intenzivnější proces zvlákňování, protože je zapotřebí překonat gravitaci.

U obou druhů zvlákňování je možné pracovat kontinuálně nebo diskontinuálně. U diskontinuálního procesu je nutné zastavit proces a vyměnit sběrnou textilií umístěnou na kolektoru.

TRYSKOVÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ

Zvlákňovací elektroda je pouze jedna tryska nebo jedna kapilára (obr. 7). Polymer se vytlačuje skrz ně. Největší intenzita elektrostatického pole se koncentruje na hrotu kapiláry, což umožňuje proces elektrostatického zvlákňování. Tato metoda byla jako první použita pro tvorbu nanovláknenných vrstev. [13] Výhodou je rychlá a jednoduchá změna parametrů ovlivňujících zvlákňování. Nevýhodou je velice nízká produktivita, protože se na hrotu kapiláry vytvoří pouze jeden Taylorův kužel. Proto se tato metoda využívá spíše pro laboratorní užití. [18]



Obr. 7: Detail zvlákňovací trysky. Čerpáno z [18].

VÍCE TRYSKOVÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ

Již z názvu je patrné, že tato metoda je více produktivní než předchozí díky použití více trysek vedle sebe (obr. 8). Stále se však nedá použít pro průmyslové využití. Bylo by potřeba tisíce trysek, aby se dosáhla potřebná efektivita a produktivita. [17]



Obr. 8: Více trysek ve 2 řadách vedle sebe. Čerpáno z [19].

Takovéto uspořádání trysek přináší i svoje nevýhody. Tvorba Taylorových kuželů je ovlivněna vzájemnou vzdáleností trysek. Musí být také zkoumána stabilita proudů, jelikož náboje nesené každým proudem deformují elektrostatické pole a ovlivňují tak pole všem ostatním proudům v blízkosti. [17] Trysky mohou být v jedné nebo ve více řadách vedle sebe.

ZVLÁKŇOVÁNÍ Z VOLNÉ HLADINY

Tento způsob byl vyvinut na Katedře netkaných textilií Technické univerzity v Liberci. Hlavní princip této metody spočívá v poznatku, že Taylorovy kužely je možné vytvořit i na tenké vrstvě polymerního roztoku (obr. 9). Metoda tedy nevyužívá k formování vláken žádné trysky a kapiláry a její produktivita je podstatně vyšší než produktivita ostatních zmiňovaných způsobů výroby nanovláken pomocí elektrostatického zvlákňování. [9] Vzhledem k časté toxicitě rozpouštědel je metoda určena pro zpracování vodorozpustných systémů, což ale nevylučuje možnost vytvořit nanovlákná i z jiných polymerů než těch rozpustných ve vodě. [9]

Jak již bylo řečeno, vlákna jsou formována pomocí elektrostatického pole z tenké vrstvy polymerního roztoku a jsou sebrána na kolektoru ve formě netkané textilie. Průměr vláken se pohybuje v rozmezí 100-300nm.



Obr. 9: Zvlákňování z volné hladiny. Čerpáno z [20].

3.6.4 OVLIVŇUJÍCÍ PARAMETRY

Schopnost polymeru formovat se do vláken je označována jako zvláknitelnost a ve skutečnosti je to soubor vlastností, které tuto schopnost ovlivňují. Parametry jsou rozdělovány nejčastěji na procesní a systémové. [9]

Mezi procesní parametry mající vliv na tvorbu vláken metodou elektrostatického zvlákňování patří elektrická vodivost a dielektrické vlastnosti polymerního roztoku nebo taveniny, intenzita elektrického pole a elektrický proud procesu, vzdálenost kolektoru od zvlákňovací elektrody, okolní parametry jako je teplota a vlhkost. [21]

Systémové parametry jsou především vlastnosti zvlákňovaného materiálu. Například molekulová hmotnost polymeru, viskozita, hustota roztoku nebo teplota zvlákňování, která je důležitá zejména při zvlákňování polymerních tavenin. [9] [21]

Zmíněné parametry nejsou stejné pro různé druhy polymerů a pro každý nový materiál je nutné hledat ideální podmínky procesu. Parametry působí na průměr vláken, hustotu defektů a morfologii vláknenné vrstvy vzniklé z těchto vláken. [9] Tato kapitola se dále zabývá pouze parametry procesními.

NAPĚTÍ

Proces elektrostatického zvlákňování vzniká pouze tehdy, když je na elektrodách rozdílný potenciál. To znamená určité hodnoty elektrického napětí. Ve většině případů se používá stejnosměrné napětí. Hodnoty napětí se pohybují mezi 5-100kV. [13] [16] V prováděných analýzách používáme hodnoty napětí $\pm 25\text{kV}$.

Napětí a následné elektrostatické pole mají vliv na následné urychlení a prodloužení polymerního proudu po jeho vzniku. Při zvýšení napětí se dosáhne i vyšších hodnot intenzity elektrostatického pole. Proud se urychlí a nastane prodloužení, které je intenzivnější. Díky tomu se dosáhne menšího průměru vláken. [16]

Při příliš velkém napětí se Taylorův kužel ani nevytvoří. Polymerní proud potom vzniká přímo z volné hladiny nebo kapiláry. Následně vznikají objemnější proudy, které vytváří nanovlákná s větším průměrem. Zvýší se i nestabilita proudu a tím se zvýší i možnost defektů. [16]

ZVLÁKŇOVACÍ ELEKTRODA

Zvlákňovací elektroda představuje základní prvek ovlivňující tvorbu nanovláken při elektrostatickém zvlákňování. Obvyklé konstrukce jsou např. tryska, válec a drátek [9]. Svojí geometrií a rozměry určují rozložení elektrostatického pole a produkci zařízení.

Tryska se používá především pro laboratorní účely. Válcová elektroda je produktivnější než tryska nebo kapilára, ale hodnoty intenzit nedosahují takových hodnot, jako u jiných druhů elektrod. Z tohoto důvodu je správné nastavení všech parametrů zvlákňování velice náročné. Nespornou výhodou elektrody ve formě drátku je možnost velké pracovní šířky stroje. Tato metoda se využívá u průmyslového zařízení.

KOLEKTOR

Nejčastějšími druhy jsou deskové a válcové kolektory. Kolektor je téměř vždy z vodivého materiálu. Vlákna uložená na nevodivém kolektoru nejsou tak hustá v porovnání s vodivým kolektorem. Jsou dále od sebe. Elektrické náboje na vodivém kolektoru umožňují uložení většího množství vláken. [16]

VZDÁLENOST MEZI ELEKTRODAMI

Při menší vzdálenosti elektrod má proud menší dráhu. Navíc se zesílí intenzita elektrostatického pole a proud se urychlí. V důsledku toho se nemusí rozpouštětlo zcela odpařit. Snižování vzdálenosti má podobný vliv jako zvyšování napětí. Může nastat větší nestabilita proudu a může vznikat více defektů. Pokud je ovšem při nízké vzdálenosti optimální velikost intenzity, vytvoří se méně defektů. Vzdálenost ale nesmí být moc krátká, protože by se mezi elektrodami vytvářely jiskry. [9] [16]

Zvyšováním vzdálenosti se sníží průměr vláken, protože proud má větší čas na dloužení, ale může docházet k defektům. Při příliš velké vzdálenosti mezi elektrodami se na kolektor nemusí usazovat vlákna žádná. [16]

4 SIMULACE ELEKTROSTATICKÉHO POLE

V této bakalářské práci je pro analýzy použit software Autodesk Algor Simulation 2012. Simulace se provádí konkrétně pro analýzu elektrického pole. Jako materiálová konstanta zde vystupuje relativní permitivita a okrajovou podmínkou je velikost napětí. Celý postup simulace se skládá z preprocessingu, processingu a postprocessingu.

4.1 PREPROCESSING

TVORBA GEOMETRICKÉHO MODELU

Sestava zařízení pro elektrostatické zvlákňování byla vytvořena v programu Pro/Engineer Creo Parametric 2.0. Jelikož by byl tento model příliš složitý, na výpočet extrémně náročný a obsahoval spoustu součástí, které mají jen nepatrný, nebo vůbec žádný vliv na průběh elektrostatického pole, byl vytvořen model náhradní.

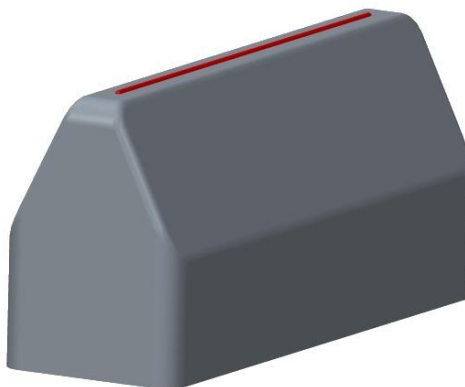
Tento náhradní model byl sestaven pouze z pěti částí. První částí byl prostor uvnitř zvlákňovací komory, jelikož ty komponenty, které jsou vně zařízení, neovlivňují elektrostatické pole. Pro zpřesnění výsledků v okolí elektrody a zvlákňovací hlavy byla vytvořena podoblast zahrnující blízké okolí elektrod.

Sestava dále obsahovala kolektor (obr. 10), na kterém byly zaobleny všechny rohy k potlačení singularit.



Obr. 10: Model kolektoru.

Zvlákňovací hlava byla zjednodušena nejvíce. Vymodelovala se jako jedna část (obr. 11), a byly na ní odstraněny všechny otvory, dutiny a šrouby. Zvlákňovací elektroda byla vytvořena jako kruhový drát o průměru 1,5mm a délce 100mm.



Obr. 11: Zjednodušený model zvlákňovací hlavy s elektrodou

Jak již bylo zmíněno, model vzduchu byl rozdělen na 2 části (obr. 12). Přičemž vnitřní část byla následně generována s výrazně jemnější sítí. Tento přístup umožnil snížit čas výpočtu.

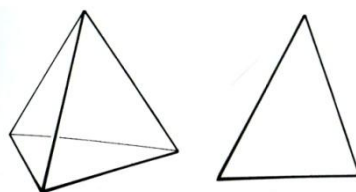


Obr. 12: Zjednodušený model celé sestavy

DEFINOVÁNÍ VLASTNOSTÍ MODELU

Jaký materiál se definoval jednotlivým částem, záviselo pouze na hodnotě relativní permitivity, která zde vycházela jako jediná materiálová konstanta. Vzduch má relativní permitivitu stejnou jako vakuum, čili 1. Zvlákňovací hlavě se přiřadil materiál HDPE, což je vysoko hustotní polyetylén, který má hodnotu relativní permitivity 2,3. Elektrodám, kolektoru i zvlákňovací elektrodě, které jsou z kovu, se přiřadila největší možná relativní permitivita a to 10^9 . Kovové vodivé materiály mají tuto hodnotu teoreticky nekonečně velkou.

Dále se zvolil typ elementu, který se posléze použil při generaci sítě. Volba typu elementu závisela na typu analýzy a zvolené dimenzi. Pro 3D analýzy se zvolily elementy nazývané tetrahedrony (obr. 13). Analýzy se prováděly také ve 2D, kde se zvolil trojúhelníkový prvek.



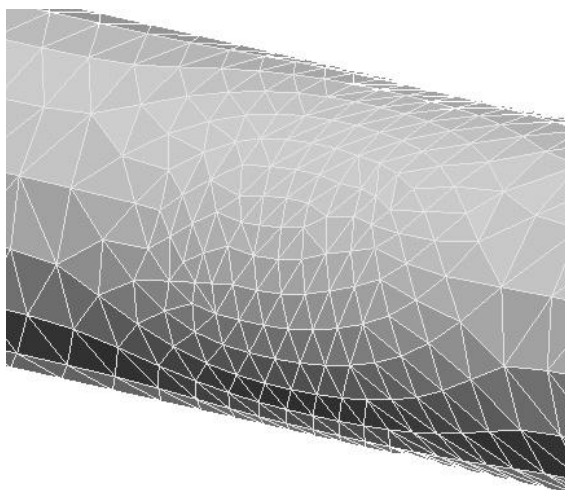
Obr. 13: Použité typy elementů. Tetrahedron a trojúhelník.

Nakonec se definovaly okrajové podmínky. Na povrchy elektrod se zadalo napětí o velikosti $\pm 25\,000\text{V}$. Kladný potenciál napětí na zvlákňovací elektrodu a záporný potenciál na kolektor. Na vnější plochy modelu se zadala podmínka 0V , což značilo uzemnění skříně. Hodnota tuhosti byla zadána pro všechny okrajové podmínky stejná a to 10^9 . Taková tuhost zaručovala, že hodnota v uzlu bude téměř stejná jako hodnota zadaná.

GENEROVÁNÍ SÍTĚ KONEČNÝCH PRVKŮ

Síť lze vygenerovat přímo nebo automaticky. Jelikož byl k dispozici 3D model zvlákňovacího zařízení, byla použita automatická generace sítě. V optimálním případě byla snaha dosáhnout co nejvhodnější sítě, která představovala rovnováhu mezi přesností řešení a délkou výpočtu. Čím se definovala jemnější síť, tím se dostávalo přesnějších výsledků. Doba výpočtu ale rychle stoupala.

Síť lze také zahustit lokálně. V určité oblasti, která je zadána bodem a poloměrem. Toto zahuštění se provedlo ve sledovaných místech zvlákňovací elektrody a to uprostřed elektrody (obr. 14) a dále 40mm od středu zvlákňovací elektrody.



Obr. 14: Lokální zahuštění sítě uprostřed zvlákňovací elektrody.

Pro generování objemové sítě byly použity pouze prvky typu tetrahedron, které Algor v manuálu doporučoval pro tento typ analýzy.

5.2 PROCESSING

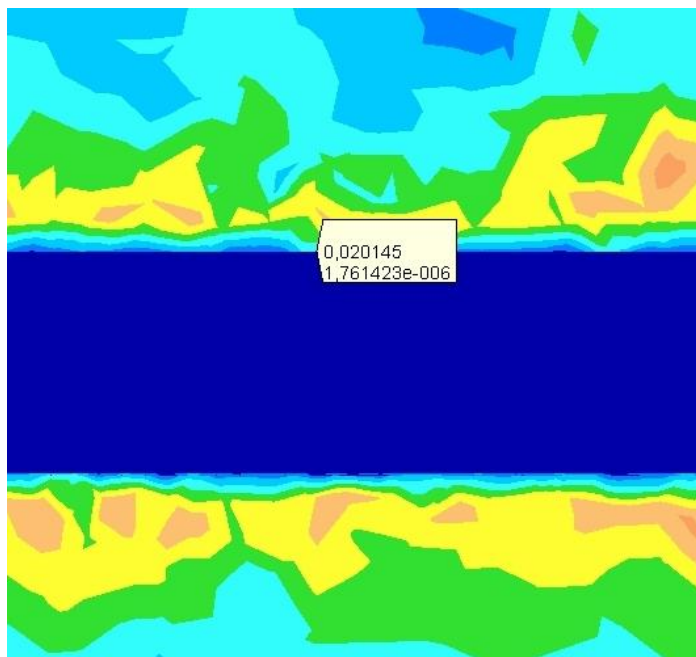
V této fázi se vygenerují veškeré potřebné rovnice a následně je proveden jejich výpočet. Pro konkrétní výpočty byla nastavena hodnota využití paměti RAM na 90%.

5.3 POSTPROCESSING

Postprocessing zahrnuje zobrazení výsledků graficky nebo numericky. Software, který byl použit, umí zobrazit přesnost intenzity elektrostatického pole podle vztahu (5). Přesnost nabývá hodnot 0-0,5. [26] Čím menší hodnota, tím přesnější výsledek v daném uzlu.

$$P_i = \frac{|E_i|_{max} - |E_i|_{min}}{2|E|_{max}} \quad (5)$$

Parametry sítě se definovaly tak, aby přesnost v důležitých místech, ze kterých se odečítaly hodnoty, byla maximálně 0,03 (obr. 15). Tato podmínka byla s výše uvedeným nastavením sítě splněna.



Obr. 15: Zobrazení přesnosti v místě odečítání hodnoty $E_{střed}$.

5 ANALÝZA PŮVODNÍ KONSTRUKCE

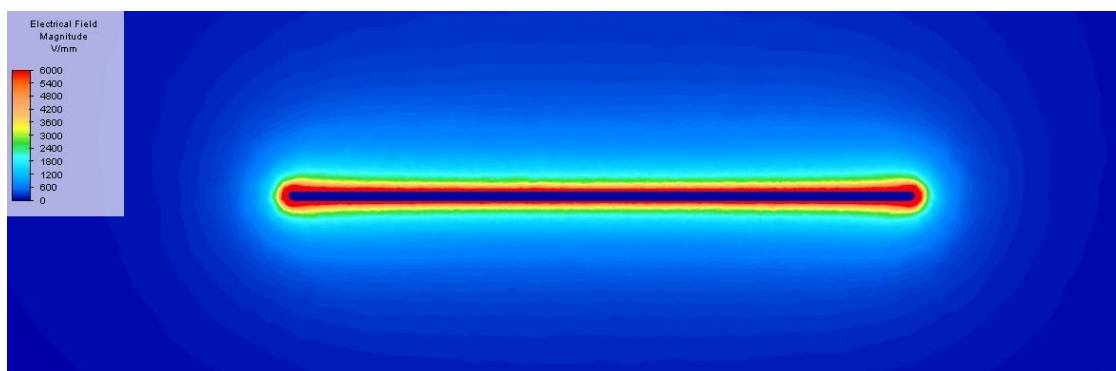
Původní konstrukce zvlákňovací hlavy byla na obr. 13. Analýza se prováděla nejprve se zvlákňovací elektrodou a poté se do sestavy přidala zvlákňovací hlava.

Důležité body, ve kterých byla sledována velikost intenzity elektrostatického pole, se nacházejí ve středu zvlákňovací elektrody, tato hodnota byla označena $E_{\text{střed}}$, a 40mm od středu elektrody. Ta se označila jako E_{40} . Tato vzdálenost je důležitá, protože proces zvlákňování se uskutečňuje v délce 80mm na zvlákňovací elektrodě. Požadavek tedy byl, aby hodnoty $E_{\text{střed}}$ a E_{40} byly stejné. To by způsobilo ukládání rovnoměrných vrstev totožných nanovláken na ploše kolektoru. Hodnoty intenzit a jejich poměr je zaznamenán v tabulce 1.

Tab. 1: Hodnoty intenzit pro původní řešení zvlákňovací hlavy a elektrody

	$E_{\text{střed}}$ [V/mm]	E_{40} [V/mm]	poměr
elektroda	7625	8499	0,8972
elektroda+hlava	6187	6987	0,8855

Z tabulky 1 vyplývá, že se poměr po přidání zvlákňovací hlavy do sestavy ještě více zhoršil.



Obr. 16: Rozložení pole na původní zvlákňovací elektrodě.

Největších hodnot se dosahovalo na koncích zvlákňovací elektrody (obr. 16). Tyto konce odebíraly velké množství intenzity a způsobovaly nerovnoměrnost elektrostatického pole směrem ke středu elektrody. Proto bylo toto konstrukční řešení pro proces rovnoměrného elektrostatického zvlákňování nevhodné.

6 ANALÝZA TVARU ZVLÁKŇOVACÍ ELEKTRODY

Analýzy tvaru elektrody se prováděly pouze ve 2D. To zkrátilo dobu výpočtu na desetinu. Sledovaly se maximální hodnoty intenzit na zvlákňovací elektrodě. Tato veličina se označila E_{2D} . Do softwaru Algor se převedl řez sestavou, která se skládala pouze z oblasti reprezentující vzduch, kolektoru a samotné zvlákňovací elektrody.

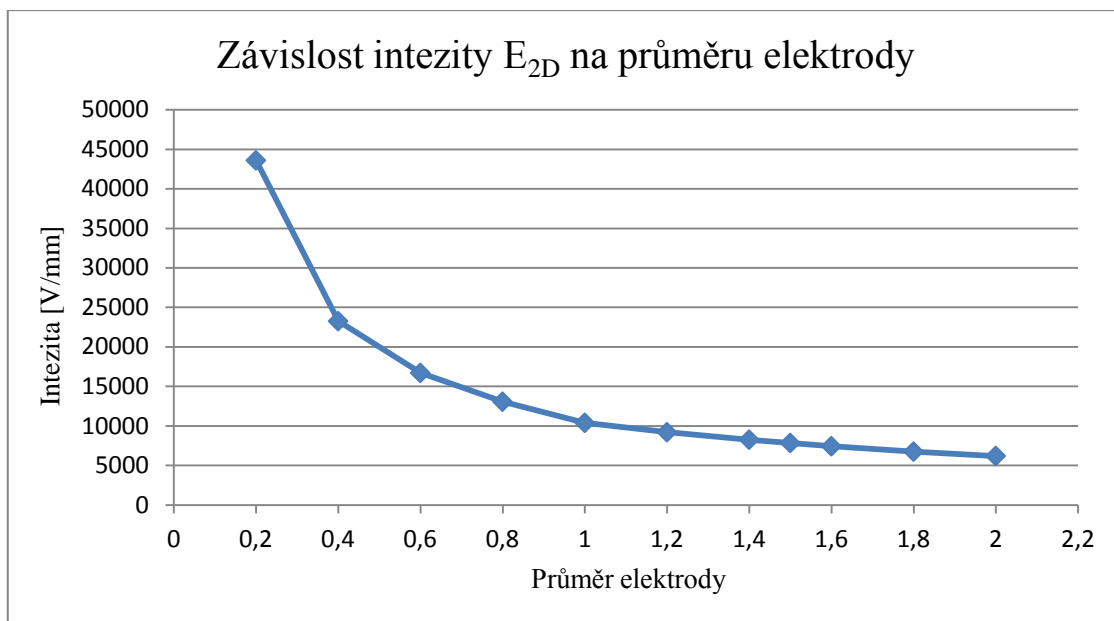
6.1 ZMĚNA PRŮMĚRU ELEKTRODY

Pro analýzu intenzity elektrostatického pole se velikosti průměrů postupně volily 0,2mm, 0,4mm, 0,6mm, 0,8mm, 1,0mm, 1,2mm, 1,4mm, 1,5mm, 1,6mm, 1,8mm a 2,0mm. (tab. 2, graf 1). V grafu 1 lze vidět, že při snižování průměru elektrody přibližně do průměru 1 mm je nárůst intenzity pozvolný. Při dalším snižování průměru se hodnota intenzity postupně zvyšuje směrem k nekonečným hodnotám.

Tab. 2: Max. intenzity na povrchu elektrody při změně jejího průměru.

$\varnothing d$ [mm]	E_{2D} [V/mm]
0,2	43600
0,4	23256
0,6	16701
0,8	13065
1	10392
1,2	9204
1,4	8258
1,5	7845
1,6	7430
1,8	6751
2	6197

Průměr elektrody v původním řešení byl 1,5mm. Úkolem práce bylo optimalizovat elektrostatické pole, proto se průměr zvlákňovací elektrody 1,5mm ponechal pro následnou optimalizaci pole.



Graf 1: Závislost intenzity na průměru elektrody. Průměry 0,2-2,0 mm.

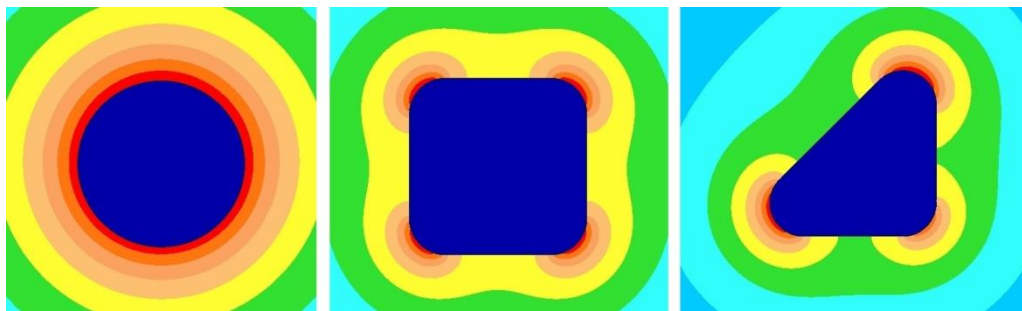
6.2 ZMĚNA TVARU ELEKTRODY

Další profily elektrody se namodelovaly dva. Čtvercový a trojúhelníkový tvar s výchozími rozměry 1,5 x 1,5mm. Všechna zaoblení se zvolila 0,2mm. Pro srovnání se přidala kruhová elektroda o průměru 1,5mm. Maximální hodnoty intenzit elektrostatického pole se zaznamenaly do tab. 3.

Tab. 3: Max. intenzity na povrchu elektrody při změně tvaru.

Profil elektrody	E_{2D} [V/mm]
kruhový	7845
čtvercový	10205
trojúhelníkový	12487

V místech malých zaoblení se vytváří větší intenzita napětí. V tomto případě tedy v rozích čtvercové a trojúhelníkové elektrody (obr. 17). Z tab. 3 je patrné, že maximální intenzity na těchto elektrodách jsou vyšší než na elektrodě kruhové.



Obr. 17: Rozložení elektrostatického pole na povrchu různých elektrod.

Kruhová elektroda má ale jednu nespornou výhodu. Na celé ploše, přes kterou teče polymer, což je horní půlka kruhového profilu, je téměř stejná hodnota intenzity. Největší odchylka od maximální hodnoty intenzity byla 150V/mm. U čtvercové byla intenzita mezi zaoblenými nižší téměř dvakrát než její maximální hodnota. U profilu trojúhelníku dosahovaly tyto hodnoty až 2,5 násobného snížení.

Pro následnou optimalizaci zvlákňovací elektrody byla použita elektroda s kruhovým profilem. Z důvodu rovnoměrného rozložení pole a s přihlédnutím na čas, který je potřeba k nastartování reálného procesu zvlákňování polymeru z volné hladiny, byl tento profil nejpříjemnější.

7 OPTIMALIZACE ELEKTROSTATICKÉHO POLE

V následující části bylo ve snaze optimalizovat rozložení elektrostatického pole navrženo umístění dvou stejně velkých koulí na konce zvlákňovací elektrody. Nejprve koule z kovu a následně z plastu. Následně se navrhla zvlákňovací elektroda ve formě desky. Velikost intenzity se odečítala také z povrchu koule. Veličina se označila E_{koule} .

7.1 NÁVRH KOULÍ

KOVOVÉ KOULE

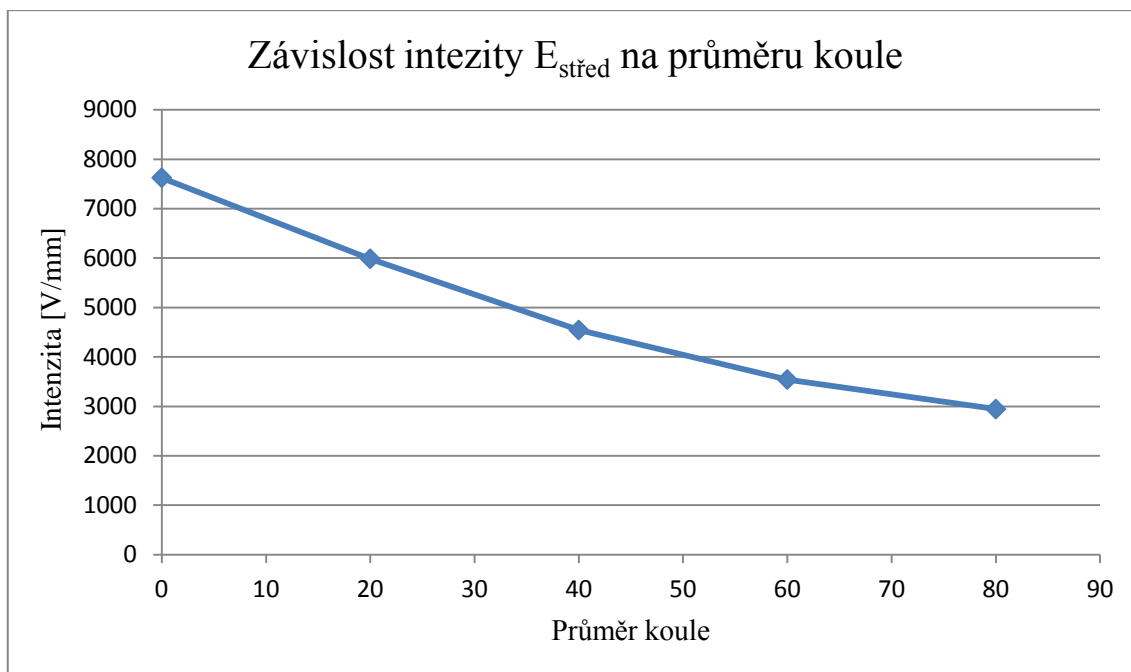
Průměr D koulí se postupně volil 20mm, 40mm, 60mm a 80mm. Elektroda mezi koulemi byla dlouhá 100mm a měla kruhový profil o průměru 1,5mm. Zaoblení v přechodu z elektrody na koule byl 0,2mm. Hodnoty se opět odečítaly uprostřed zvlákňovací elektrody, 40mm od středu elektrody a navíc z povrchu koule (tab. 4).

Tab. 4: Hodnoty intenzit při změně průměru kovových koulí.

	Intenzita [V/mm]		
Ø D [mm]	$E_{\text{střed}}$	E_{40}	E_{koule}
0	7625	8499	x
20	5985	4612	2187
40	4544	2687	1282
60	3543	1989	909
80	2945	1479	750

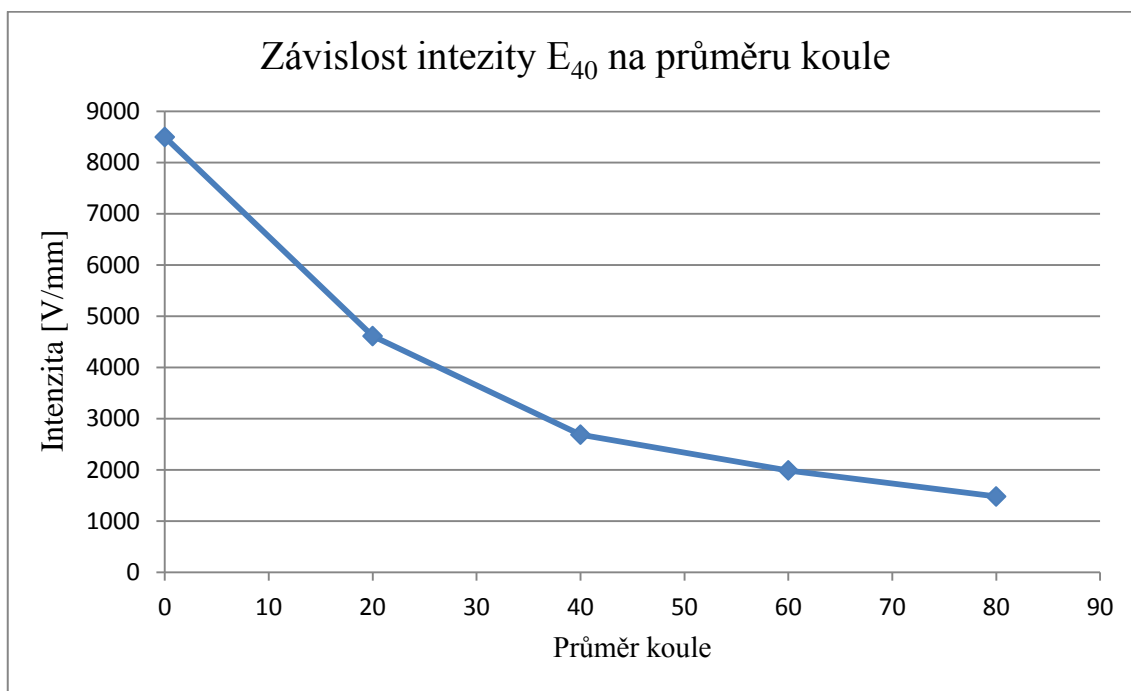
Z tabulky 4 je vidět, že malé koule odebíraly velké množství intenzity. Čím se ale zvětšoval průměr koulí, tím se na jejich povrchu vyskytovaly menší hodnoty intenzity (graf 4).

Hodnota $E_{\text{střed}}$ se po přidání kovových koulí o průměru 20mm snížila o 1640 V/mm a dále klesala se zvětšujícím se průměrem koulí (graf 2). Rozdíl se mezi jednotlivými intenzitami postupně snižoval. Dá se tedy předpokládat, že by intenzity při dalším zvětšování koulí již výrazně neklesaly.

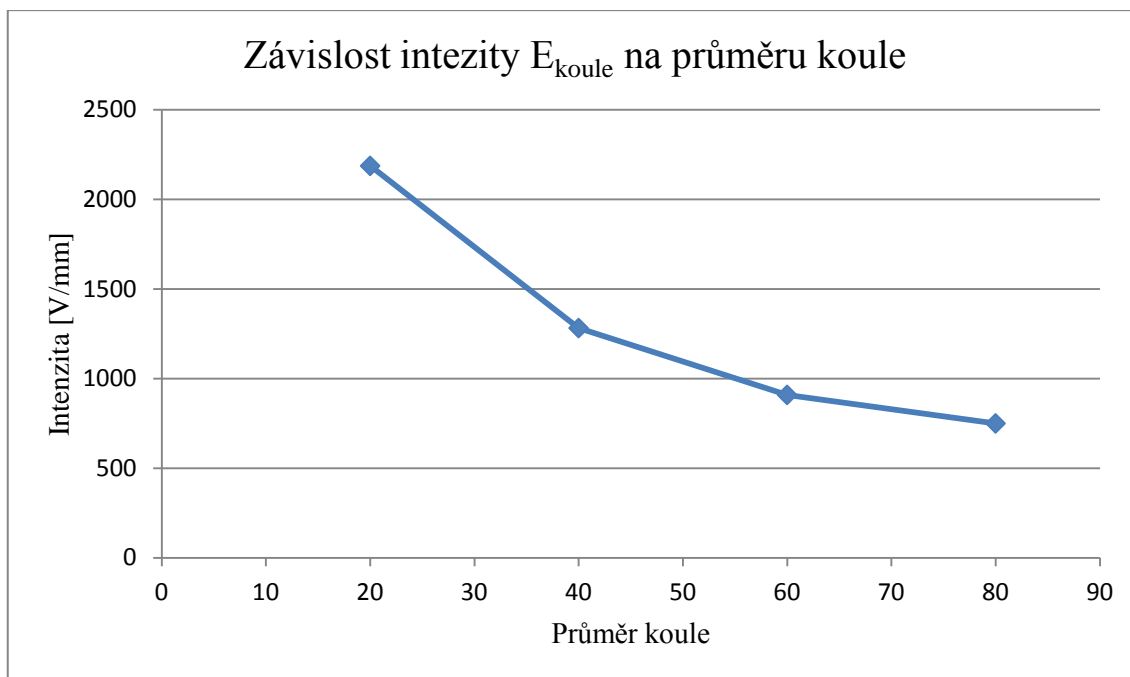


Graf 2: Závislost hodnoty $E_{\text{střed}}$ na průměru kovových koulí.

V místě zaoblení mezi elektrodou a koulí se intenzita pohybovala v minimálních hodnotách. To nejvíce ovlivňovalo hodnotu E_{40} (graf 3). Tato hodnota výrazně poklesla po přidání koulí s průměrem 20mm a nadále se snižovala se zvětšujícím se průměrem kovových koulí.

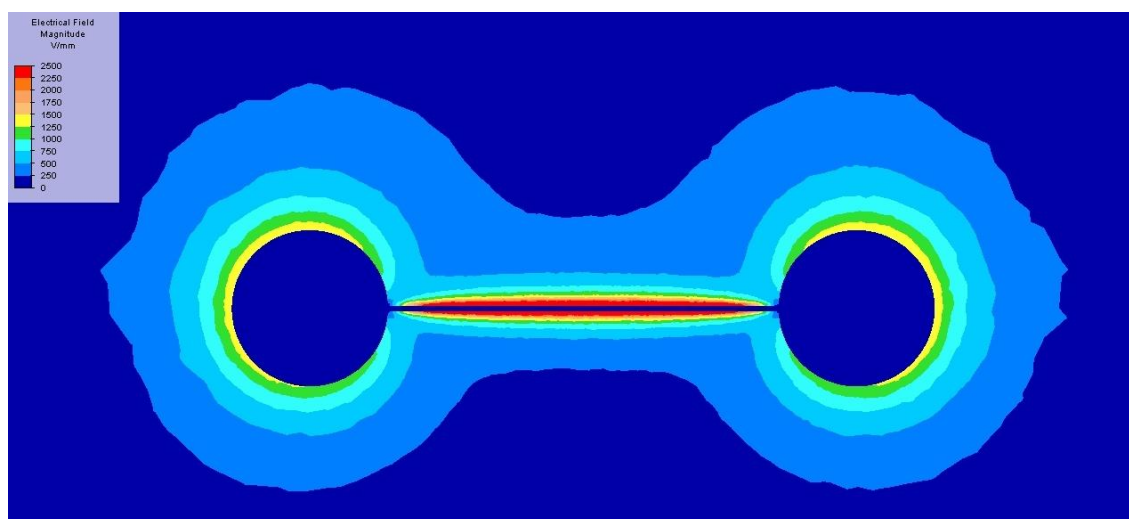


Graf 3: Závislost hodnoty E_{40} na průměru kovových koulí.



Graf 4: Závislost hodnoty E_{koule} na průměru kovových koulí.

Přidáním koulí ze stejného materiálu jako je zvlákňovací elektroda, tedy z kovu, docházelo k opačnému efektu než bez koulí. Ty totiž způsobovaly opačnou nerovnoměrnost intenzity elektrostatického pole (obr. 18). Hodnoty $E_{střed}$ uprostřed elektrody byly postupně až dvakrát vyšší než hodnoty E_{40} . Z tohoto důvodu bylo konstrukční řešení s kovovými koulemi nevhodné.



Obr. 18: Znázornění nerovnoměrnosti pole v důsledku kovových koulí.

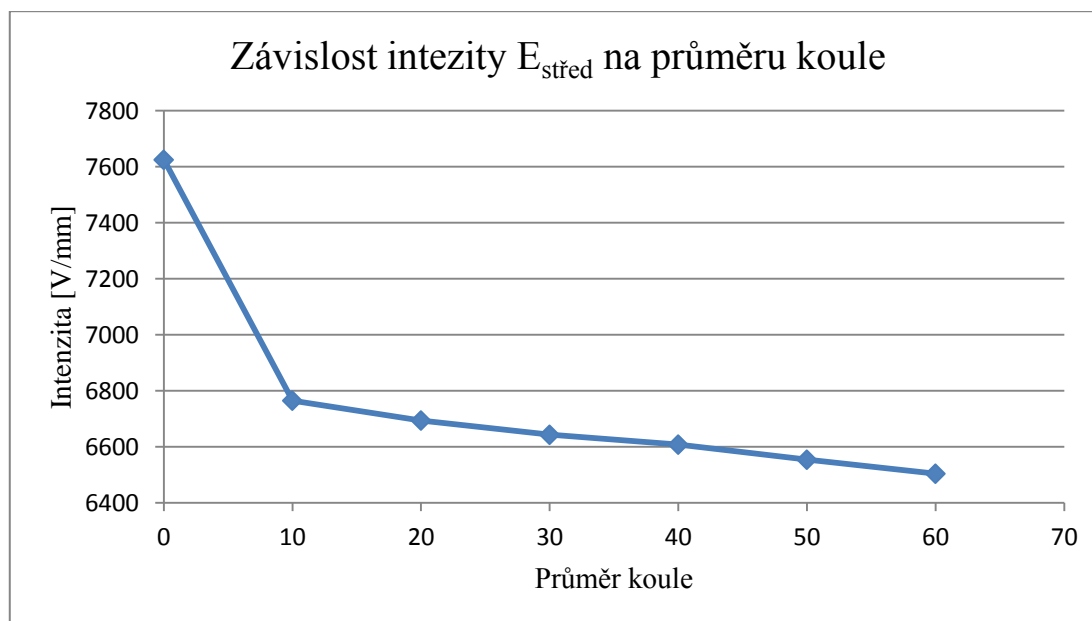
PLASTOVÉ KOULE

Pro plastové koule se volily průměry 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm a 60mm. Hodnoty intenzit se ze sledovaných míst zaznamenaly do tab. 5.

Tab. 5: Hodnoty intenzit při změně průměru plastových koulí.

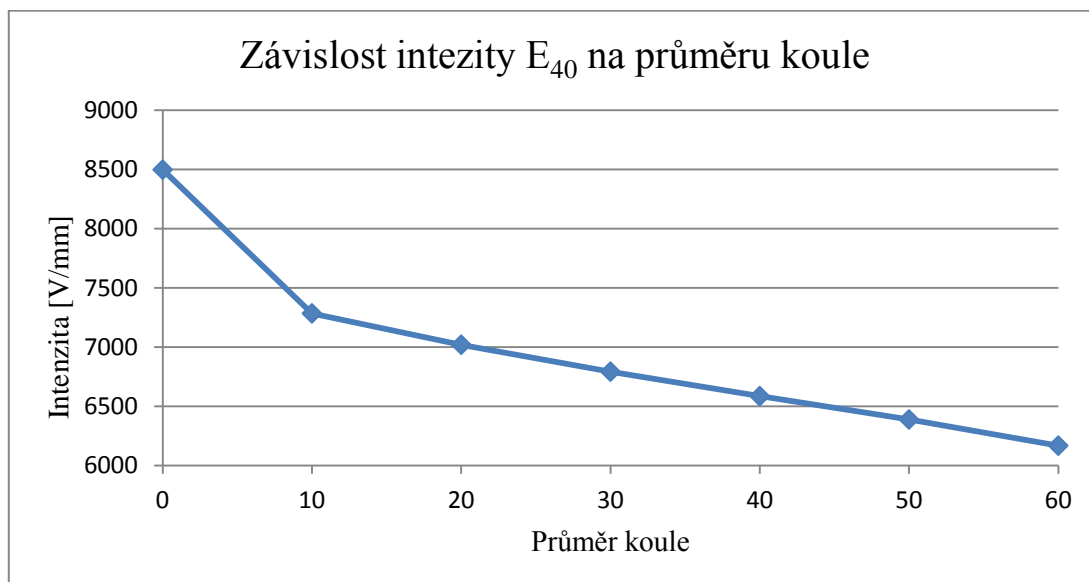
Ø D [mm]	Intenzita [V/mm]			Poměr $E_{\text{střed}}/E_{40}$
	$E_{\text{střed}}$	E_{40}	E_{koule}	
0	7625	8499	x	0,8972
10	6765	7285	1652	0,9286
20	6694	7020	789	0,9536
30	6643	6793	523	0,9779
40	6608	6576	385	1,0049
50	6554	6389	311	1,0258
60	6504	6168	267	1,0545

Z tab. 5 je patrné, že po přidání plastových koulí o průměru 10mm se hodnota $E_{\text{střed}}$ snížila o výrazných 860 V/mm. Při dalším zvětšování průměru koulí již intenzita klesala přibližně o 50 V/mm (graf 5).



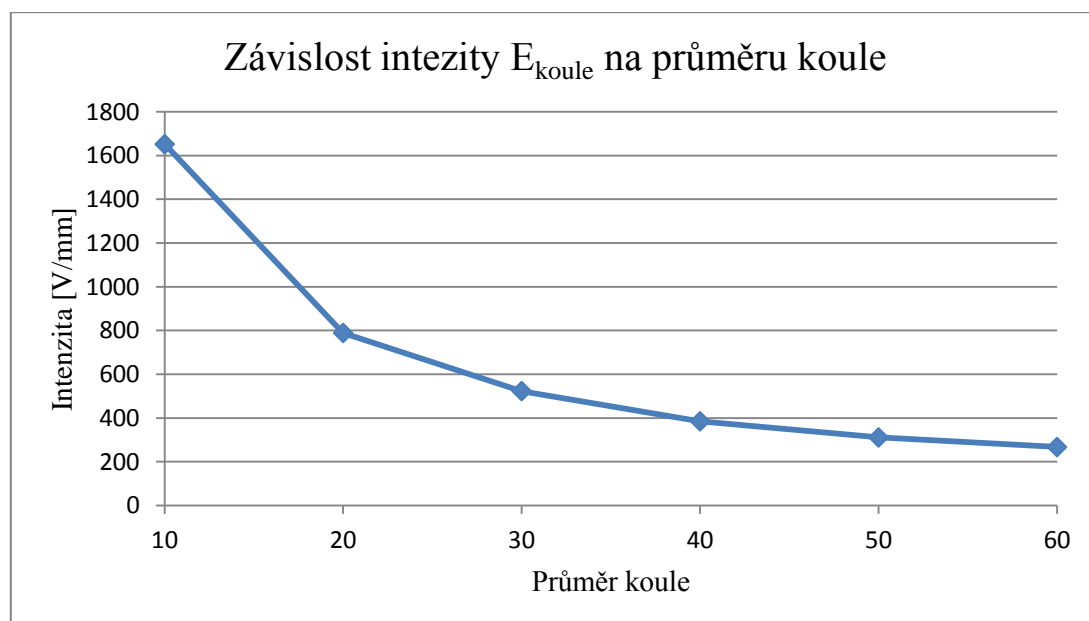
Graf 5: Závislost intenzit $E_{\text{střed}}$ na průměru plastových koulí.

Hodnota ve vzdálenosti šířky zvláknovacího procesu E_{40} se chovala obdobně (graf 6). Také došlo po přidání koulí o průměru 10mm k výraznějšímu snížení. Při dalším zvětšování průměru koulí docházelo k většímu klesání intenzity, než tomu bylo u hodnoty $E_{střed}$. Počáteční hodnota E_{40} byla vyšší než počáteční hodnota $E_{střed}$.



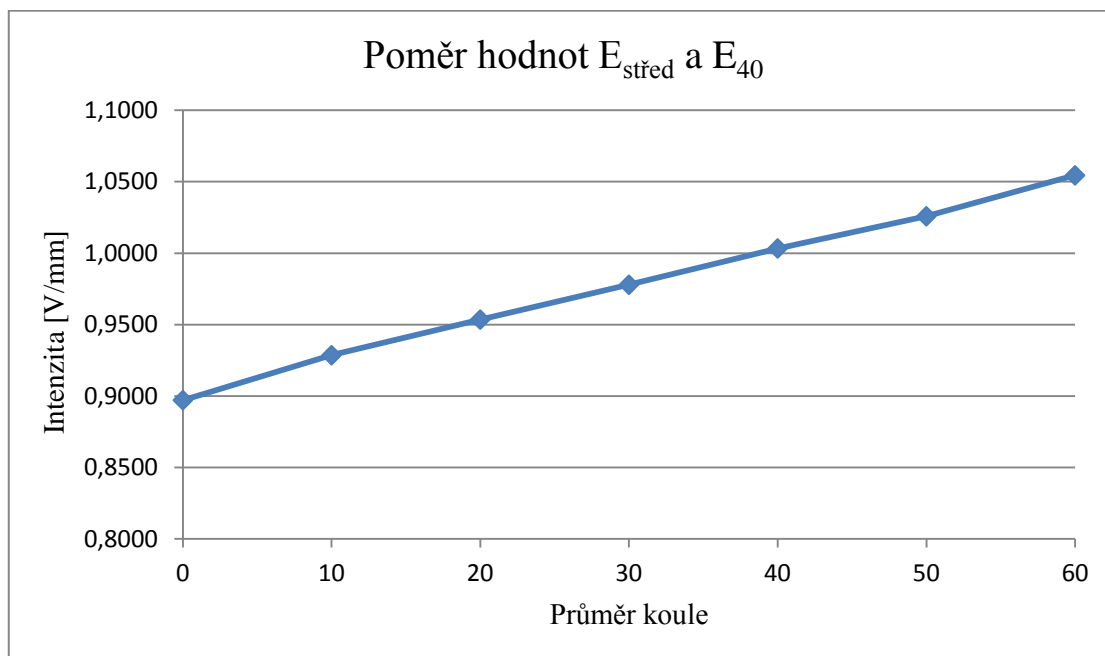
Graf 6: Závislost intenzit E_{40} na průměru plastových koulí.

Sledovaly se opět intenzity na koulích, kde byly výrazně nižší hodnoty intenzit než u koulí kovových. Při dalším zvětšování průměru koulí většího než 60mm by se hodnoty pravděpodobně snižovaly jen nepatrně (graf 7).

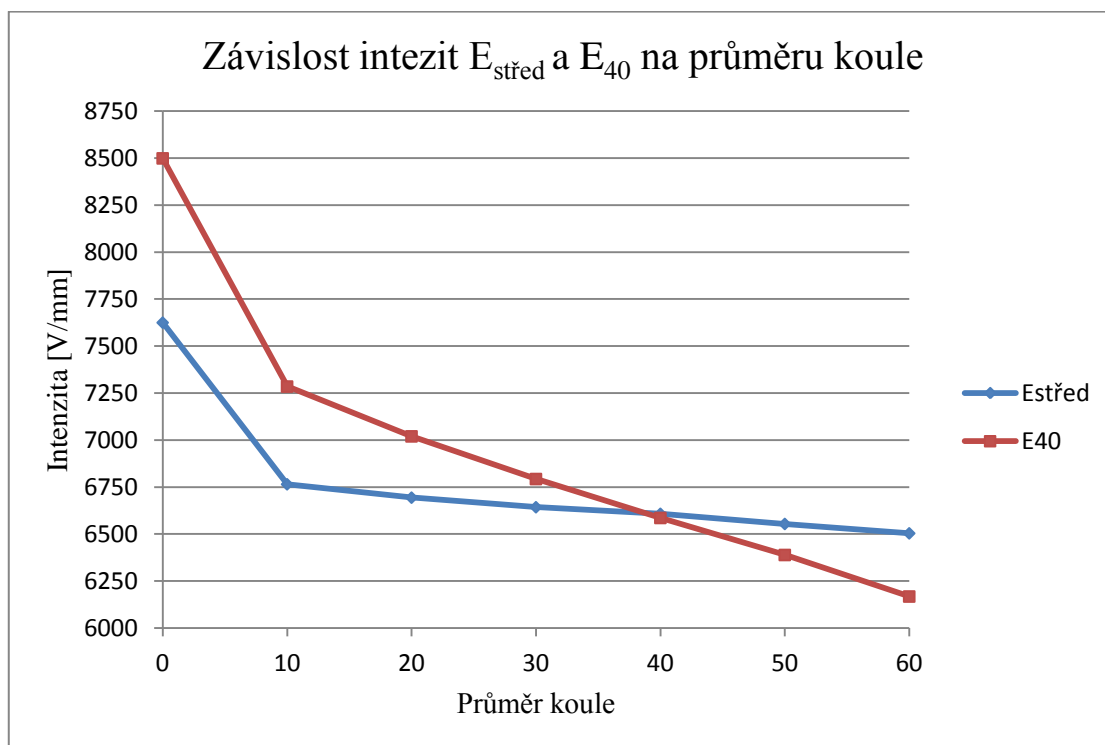


Graf 7: Závislost intenzit E_{koule} na průměru plastových koulí.

V tabulce 5 je také doplněn poměr mezi hodnotami $E_{\text{střed}}$ a E_{40} (graf 8). Tento poměr je, jak již bylo psáno, nejdůležitější aspekt při rovnoměrnosti elektrostatického pole v okolí zvláknovací elektrody. Klesání obou hodnot zároveň se zaznamenalo také do grafu pro lepší znázornění postupného vyrovňávání pole v okolí elektrody (graf 9).

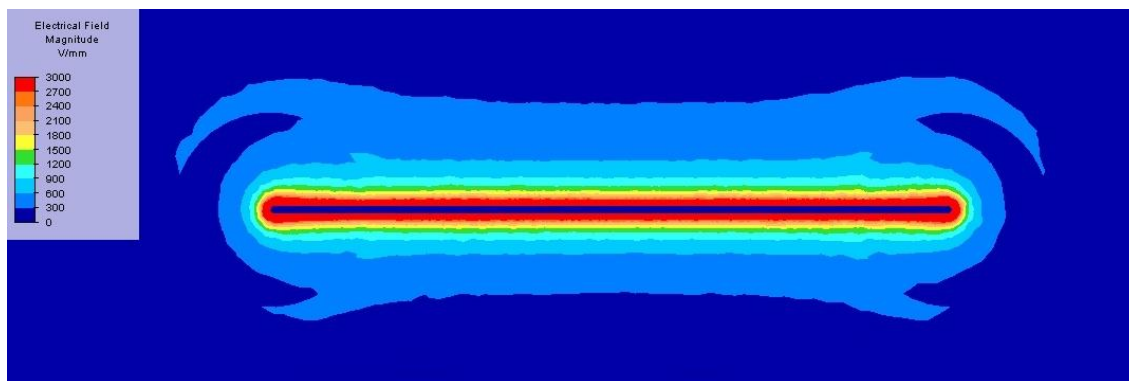


Graf 8: Změna poměru $E_{\text{střed}} / E_{40}$ při změně průměru plastových koulí.



Graf 9: Rozdílné klesání hodnot $E_{\text{střed}}$ a E_{40} při změně průměru plastových koulí.

Snahou této bakalářské práce bylo zlepšit rovnoměrnost intenzity elektrostatického pole v délce 80mm na zvlákňovací elektrodě. Znamenalo to, že poměr hodnot $E_{\text{střed}}$ a E_{40} by měl být 1,0. Z grafů 8 a 9 je patrné, že to nastalo v případě koulí s průměrem necelých 40mm. Pro návrh nových konstrukčních řešení proto byly použity plastové koule s průměrem 38mm. Ty zaručovaly požadované rozložení pole (obr. 19).



Obr. 19: Znáznornění rovnoměrnosti pole při použití plastových koulí o průměru 38mm.

7.2 NÁVRH DESKY

Z nutnosti připojení napětí na elektrodu byla navržena prvotní jednoduchá konstrukce elektrody ve tvaru desky (obr. 20). U té se analyzovala výška prostřední části, která je schovaná uvnitř zvlákňovací hlavy.



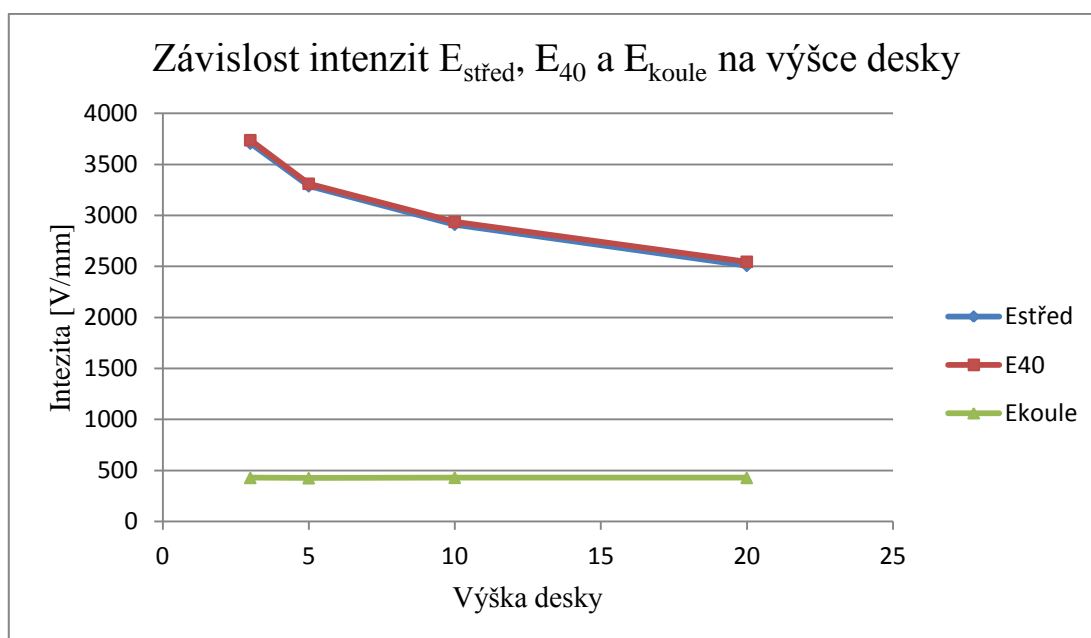
Obr. 20: Řez sestavou zvlákňovací hlavy. Deska s prostřední částí velkou 10mm.

Tloušťka desky byla 1,5mm a šířka částí pro připojení napětí byla 5mm. Velikosti střední části se volily 3mm, 5mm, 10mm a 20mm.

Sledovaly se opět hodnoty napětí $E_{\text{střed}}$, E_{40} a E_{koule} (tab. 6, graf 10).

Tab. 6: Hodnoty intenzit při změně výšky desky.

Výška [mm]	Intenzita [V/mm]		
	$E_{\text{střed}}$	E_{40}	E_{koule}
3	3706	3738	428
5	3287	3311	425
10	2910	2938	429
20	2507	2546	428



Graf 10: Závislost hodnot $E_{\text{střed}}$, E_{40} a E_{koule} na změně výšky desky.

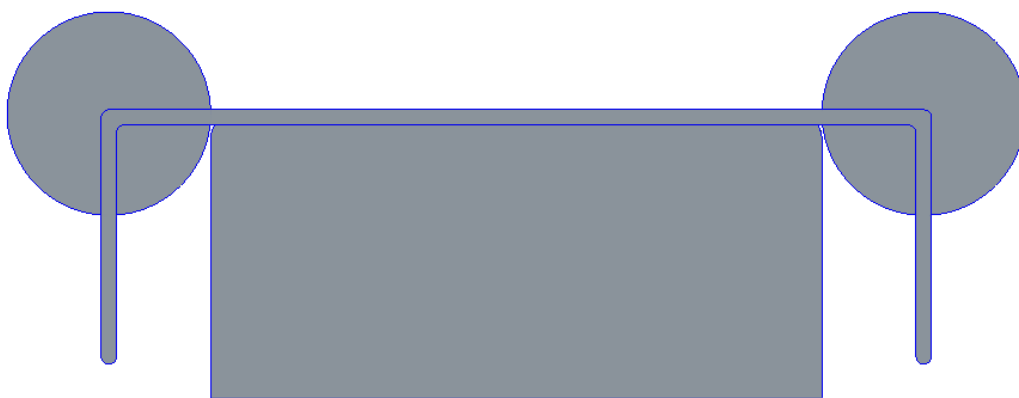
Z tab. 6 a grafu 10 lze zjistit, že hodnoty $E_{\text{střed}}$ a E_{40} , při zvětšování střední části desky, klesaly téměř totožně. Hodnoty E_{koule} se neměnily.

Z hlediska rozložení intenzity elektrostatického pole tedy nezáleželo na tom, jak velká část desky byla ve zvlákňovací hlavě, protože zásadní vliv na rovnoměrnost pole podél zvlákňovací elektrody měly přidané plastové koule s optimalizovaným průměrem 38mm.

8 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ ELEKTRODY

Na základě provedených analýz a optimalizace se navrhla 3 různá řešení zvlákňovací elektrody s možností připojení elektrického napětí. Bylo zjištěno, že navržená zvlákňovací elektroda by měla být pokud možno symetrická, aby bylo pole ovlivňováno z obou stran stejně. Řešením byly desky s tloušťkou 1,5mm. Horní hrana byla zaoblena. Šířka se vždy provedla ve dvou případech, buď 3mm nebo 5mm pro větší tuhost sestavy. Nakonec se vybralo jedno konstrukční řešení, kterému se vytvořila výkresová dokumentace.

Jako první možné řešení se navrhla deska, která prochází na obou stranách koulemi a pokračuje dolů rovnoběžně se stranami zvlákňovací hlavy (obr. 21).



Obr. 21: Řez sestavou zvlákňovací hlavy. 1. řešení.

Druhé řešení (obr. 22) a třetí řešení (obr. 23) jsou podobná. Vycházejí z prvotní konstrukce, na které se sledovala změna intenzity při zvětšování její prostřední části. Výhodou těchto konstrukcí je větší tuhost celé sestavy. Výstupy pro připojení se opírají o strany zvlákňovací hlavy. U třetího řešení jsou tyto výstupy z velké části ještě ukryty ve zvlákňovací hlavě a ven vystupují jen jejich konce.



Obr. 22: Řez sestavou zvlákňovací hlavy. 2. řešení.



Obr. 23: Řez sestavou zvlákňovací hlavy. 3. řešení.

Hodnoty intenzit pro šířku 3mm i 5mm se zaznamenaly do tab. 7.

Tab. 7: Hodnoty intenzit nových konstrukčních řešení.

konstrukce	šířka 3mm			šířka 5mm		
	Intenzita [V/mm]		$E_{\text{střed}}/E_{40}$	Intenzita [V/mm]		$E_{\text{střed}}/E_{40}$
	$E_{\text{střed}}$	E_{40}		$E_{\text{střed}}$	E_{40}	
1. řešení	3678	3665	1,0035	3204	3195	1,0028
2. řešení	3699	3685	1,0038	3336	3328	1,0024
3. řešení	3542	3535	1,0020	3150	3139	1,0035

V tab. 7 jsou hodnoty intenzit $E_{\text{střed}}$, E_{40} a jejich poměr pro tyto 3 nová konstrukční řešení zvlákňovací hlavy. Hodnoty E_{koule} se vždy pohybovaly kolem hodnoty 430 V/mm, proto se do tabulky již nezaznamenaly.

Z hlediska intenzit elektrostatického pole si byla tato tři řešení velice podobná a tedy nezáleželo na tom, které by se vybralo pro srovnání s původním konstrukčním řešením a vytvoří se jí výkresová dokumentace.

Z důvodu větší tuhosti celé sestavy a snadnějšího sestavení se vybralo druhé řešení (obr. 22) se šířkou stěny 5mm a tloušťkou 1,5mm. Horní hrana byla zaoblena, což znamená, že plochy, přes které teče polymerní roztok a na kterých dochází ke zvlákňování v původním a novém navrženém řešení jsou totožné.

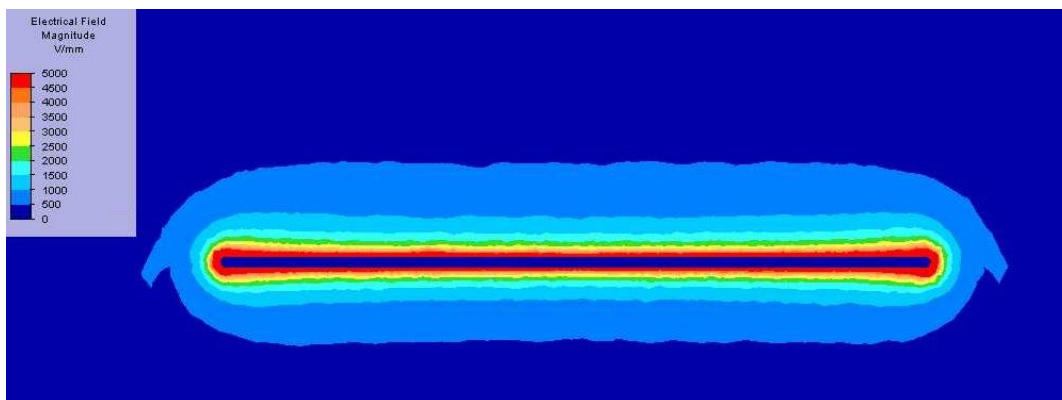
Závěrem se porovnaly hodnoty intenzit elektrostatického pole u původního a navrženého konstrukčního řešení (tab. 8).

Tab. 8: Porovnání intenzit původního řešení s nově navrženým řešením.

	$E_{\text{střed}}$	E_{40}	$E_{\text{střed}}/E_{40}$
Původní konstrukce	6187	6987	0,8855
Navržená konstrukce	3336	3328	1,0024

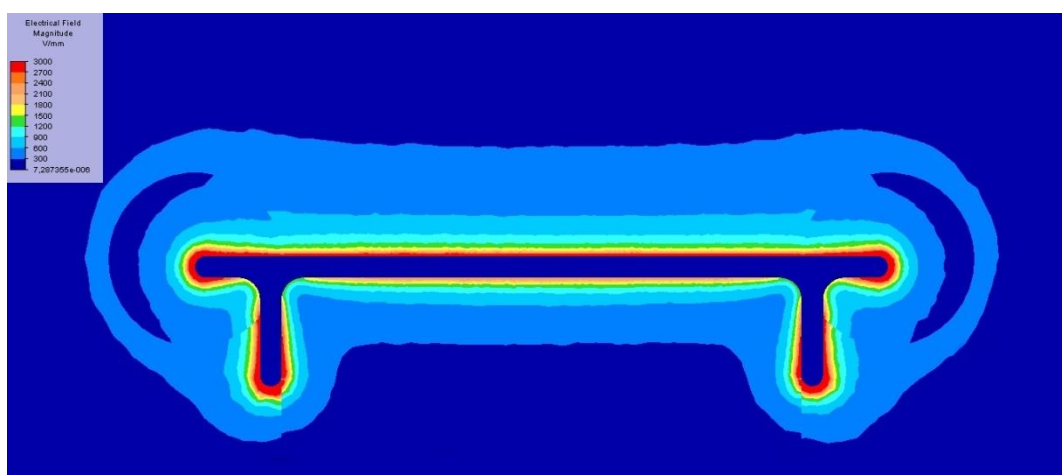
Z tab. 8 lze vidět, že hodnoty intenzit se snížily téměř dvakrát. Místo zvlákňovací hlavy s elektrodou ve tvaru pouhého drátu, který způsoboval nerovnoměrnost elektrostatického pole (obr. 24), je navržena nová konstrukce zvlákňovací hlavy s elektrodou ve tvaru desky. Na její kraje jsou nasazeny plastové koule o optimalizovaném průměru 38mm. Díky této konstrukci došlo k výraznému zlepšení rovnoměrnosti intenzity elektrostatického pole v šířce 80mm na zvlákňovací elektrodě, kde probíhá proces elektrostatického zvlákňování (obr. 25).

Pro proces elektrostatického zvlákňování je k dispozici možnost změny přivedeného napětí. V tomto případě lze zvýšením napětí dosáhnout podobných velikostí intenzit elektrostatického pole na povrchu nově navržené zvlákňovací elektrody jako při stávajícím napětí na původním konstrukčním řešení.



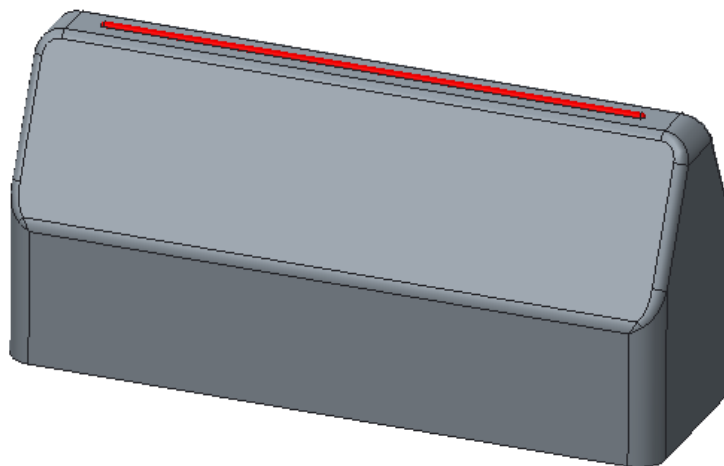
Obr. 24: Průběh elektrostatického pole u původního řešení.

Poměr hodnot $E_{\text{střed}}$ a E_{40} se dokázal touto navrženou konstrukcí zvýšit téměř na optimální hodnotu 1,0, z čehož vyplývá, že by se na celé ploše kolektoru měla ukládat rovnoměrná vrstva nanovláken se stejnou tloušťkou.

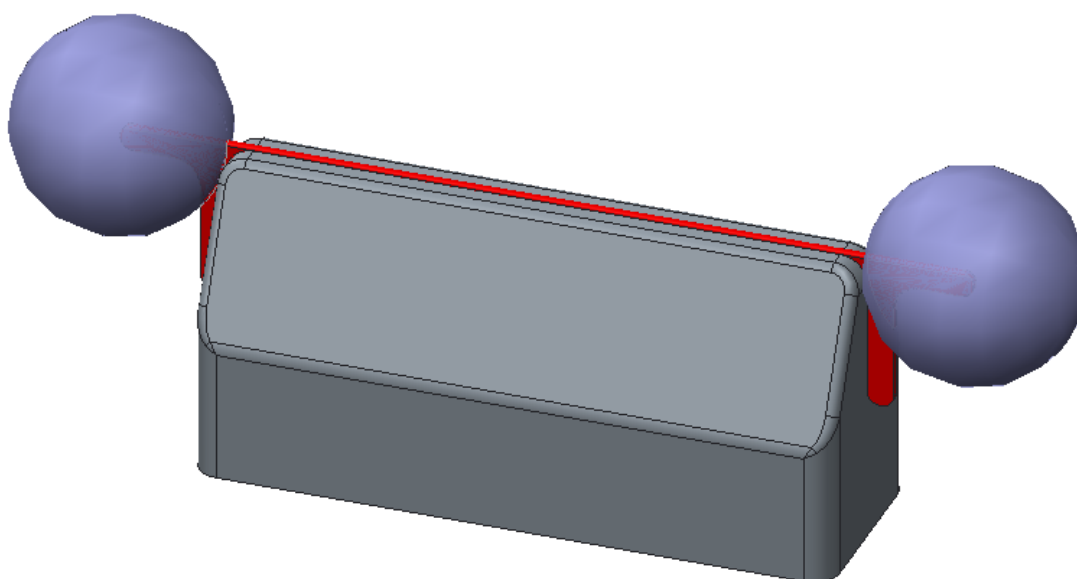


Obr. 25: Průběh elektrostatického pole u navrženého řešení.

Pro přehledné zobrazení původní a navržené konstrukce se přidaly celé modely obou zvlákňovacích hlav (obr. 26, obr. 27).



Obr. 26: Model zvlákňovací hlavy původní konstrukce.



Obr. 27: Model zvlákňovací hlavy navržené konstrukce.

Výkresová dokumentace sestavy zvlákňovací hlavy a samotné zvlákňovací elektrody navrženého řešení byla přiložena do přílohy.

9 ZÁVĚR

Úkolem této bakalářské práce byla analýza stávající zvlákňovací hlavy a následně její optimalizace z hlediska rozložení intenzity elektrostatického pole. Ta se provedla na základě výsledků analýz s využitím softwaru Autodesk Algor Simulation 2012, který pracuje s metodou konečných prvků.

V teoretické části práce byl uveden krátký výtah z elektrostatiky, po kterém následoval popis jednotlivých technologií výroby nanovláken. Z nich byl kladen důraz na elektrostatické zvlákňování.

V experimentální části práce byla provedena analýza stávající konstrukce zvlákňovací hlavy. Byl analyzován vliv různého průměru a tvaru zvlákňovací elektrody na velikost intenzity elektrostatického pole na jejím povrchu. Následně byla provedena optimalizace, ve které byl zkoumán vliv kovových a plastových koulí různých velikostí, které byly nasazeny na konce zvlákňovací elektrody s cílem zvýšit rovnoměrnost intenzity elektrostatického pole na elektrodě. Na základě výsledků optimalizace byly dále navrženy 3 varianty zvlákňovací elektrody ve tvaru desky s možností připojení elektrického napětí. Tato konstrukční řešení se z hlediska velikosti intenzity příliš nelišila. Na závěr byla vybrána varianta zvlákňovací elektrody s přidáním plastovými koulemi. Optimalizovaný průměr těchto koulí byl 38 mm. S tímto řešením zvlákňovací hlavy bylo dosaženo výrazně větší rovnoměrnosti intenzity elektrostatického pole v místě, kde se polymerní roztok dostává do kontaktu se zvlákňovací elektrodou, kde probíhá proces elektrostatického zvlákňování. Vybrané konstrukční variantě byla také vytvořena výkresová dokumentace.

Očekávaným výsledkem řešení této bakalářské práce je dosažení rovnoměrného procesu elektrostatického zvlákňování, z čehož vyplývá ukládání rovnoměrné nanovlákně vrstvy na kolektoru s obsahem nanovláken o přibližně stejné tloušťce.

10 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Elektrostatika. Cs.wikipedia.org [online]. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrostatika>
- [2] Elektrostatické pole. Cs.wikipedia.org [online]. Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrostatick%C3%A9_pole
- [3] Elektrický dipól. Cs.wikipedia.org [online]. Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_dip%C3%B3l
- [4] Intenzita elektrického pole. Cs.wikipedia.org [online]. Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Intenzita_elektrick%C3%A9ho_pole
- [5] Elektrické pole. [online] Dostupné z: <http://radek.jandora.sweb.cz/f13.htm>
- [6] Elektrický potenciál. Cs.wikipedia.org [online]. Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_potenci%C3%A1l
- [7] Ekvipotenciální plocha. Cs.wikipedia.org [online]. Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Ekvipotenci%C3%A1ln%C3%AD_plocha
- [8] LEPIL, Oldřich, Milan BEDNAŘÍK a Radmila HÝBLOVÁ. *Fyzika pro střední školy*. 3., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2001, 311 s. Učebnice pro střední školy (Prometheus). ISBN 80-719-6185-X.
- [9] RŮŽIČKOVÁ, Jana. *Elektrostatické zvláknování nanovláken*. Vyd. 2., nezměn. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006, 54 s. ISBN 80-737-2066-3.
- [10] Výroba polymerních nanovláken. Fp.tul.cz [online]. Dostupné z:
https://moodle.fp.tul.cz/nano/pluginfile.php/689/course/section/266/Predn%C3%A1ska%20205_TNA_E.Kostakova%20KNT%2CFT%2CTUL.pdf
- [11] Nanovlákn. Cs.wikipedia.org [online]. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Nanovl%C3%A1kno>
- [12] O nanovlákn. Nafigate.com [online]. Dostupné z:
<http://www.nafigate.com/cs/section/portal/app/portal-article/detail/69818-o-nanovlaknech>
- [13] Analýza a optimalizace zařízení na výrobu nanovláken. Liberec 2012. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [14] SARKAR, Arindam. *Physical principles of electrospinning*. Vyd. 1. V Liberci: Technická univerzita, 2009, 75 s. ISBN 978-80-7372-508-2.
- [15] Electrospinning. En.wikipedia.org [online]. Dostupné z:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Electrospinning>

- [16] RAMAKRISHNA, Seeram. *An introduction to electrospinning and nanofibers*. Hackensack, NJ: World Scientific, c2005, 382 s. ISBN 98-125-6454-3.
- [17] Production Nozzle-Less Electrospinning Nanofiber Technology. In: Elmarco [online]. Dostupné z: <http://www.elmarco.cz/upload/soubory/dokumenty/66-1-1-mrs-fall-boston-09.pdf>
- [18] Electrospinning equipment. IME Technologies [online]. Dostupné z: http://www.imetechnologies.nl/uploads/images/ime_electrospinning_brochure_2012.pdf
- [19] Multi-spinnerets for nanofibers electrospinning unit. Electro-spinning.com [online]. Dostupné z: http://www.electro-spinning.com/multi_spinnerets.html
- [20] Nanospider technology. Ft.tul.cz [online]. Dostupné z: http://www.ft.tul.cz/depart/knt/web/index.php?option=com_content&task=view&id=44&Itemid=44
- [21] Úvod do elektrostatičkého zvláknování. Fp.tul.cz [online]. Dostupné z: https://moodle.fp.tul.cz/nano/pluginfile.php/2264/course/section/865/Predn%C3%A1ska%20%206_TNA_E.Kostakova%20KNT%20CFT%20CTUL.pdf
- [22] Electrospinning and nanofibers. Nitk.ac.in [online]. Dostupné z: <http://www.nitk.ac.in/static/assets/files/MetMat/Dr.AS/electrospinning.pdf>
- [23] Permittivita. Cs.wikipedia.org [online]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Permittivita>
- [24] Izotropie. Cs.wikipedia.org [online]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Izotropie>
- [25] Ortotropie. Cs.wikipedia.org [online]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ortotropie>
- [26] Autodesk WikiHelp. Autodesk [online]. Dostupné z: http://wikihelp.autodesk.com/Simulation_Mechanical/enu/2012
- [27] Forcespinning. Fiberiotech.com [online]. Dostupné z: <http://fiberiotech.com/technology/how-it-works/>

11 PŘÍLOHY

Příloha 1: Výkres sestavy zvlákňovací hlavy

Příloha 2: Výkres zvlákňovací elektrody